

# フェーズドアレイ UT によるニッケル基合金溶接部の 欠陥深さ測定要領の検討

## Investigation of Phased Array UT procedure for Crack Depth Sizing on Nickel Based Alloy Weld

財団法人 電力中央研究所 平澤 泰治 Taiji HIRASAWA Member  
財団法人 電力中央研究所 岡田 久雄 Hisao OKADA  
財団法人 電力中央研究所 福富 広幸 Hiroyuki FUKUTOMI

Recently, it is reported that the primary water stress corrosion cracking (PWSCC) has been occurred at the nickel based alloy weld components such as steam generator safe end weld, reactor vessel safe end weld, and so on, in PWR. Defect detection and sizing is important in order to ensure the reliable operation and life extension of nuclear power plants. In the reactor vessel safe end weld, it was impossible to measure crack depth of PWSCC. The crack was detected in the axial direction of the safe end weld. Furthermore, the crack had some features such as shallow, large aspect ratio (ratio of crack depth and length), sharp geometry of crack tip, and so on. Therefore, development and improvement of defect detection and sizing capabilities for ultrasonic inspection technique have been required. Phased array UT technique was applied to nickel based alloy weld specimen with EDM notches and standard block with SDHs. From the experimental results, performance of phased array linear array probe and dual matrix array probe was investigated. In the basis of the results, UT procedure for crack depth sizing was manufactured. Furthermore, good accuracy of defect depth sizing by phased array UT for the inside inspection was shown.

**Keywords:** Ni Based Alloy Weld, Phased Array UT Procedure, Crack Depth Sizing, PWSCC

### 1. 緒言

近年、国内外の加圧水型原子力発電プラント（以下、PWR）の 600 系ニッケル基合金溶接部において、一次冷却水環境下での応力腐食割れ（PWSCC）の発生が報告され[1]、原子炉容器管台溶接部では、超音波探傷試験（UT）により、SCC き裂の深さ測定が困難な事例が報告された[2]。検出されたき裂は、その形状（アスペクト比が大きなき裂）により、従来の UT では、き裂先端からの端部エコーが検出困難であったことがその要因とされている[3]。

従来、ニッケル基合金溶接部は、溶接金属組織（柱状晶組織）の異方性から超音波難探傷材と言われており、溶接金属組織での超音波の屈曲、減衰に加えて、溶接金属組織からの材料ノイズエコーにより、端部エコーの検出性が低下するためである。

フェーズドアレイ UT は、探傷条件の最適化、探傷データの画像化などの特徴を有する技術であり、ニッケル基合金溶接部を対象に、多くの機関で研究開発が行なわれている[4]。

著者らは、ニッケル基合金溶接部に付与した放電

加工（EDM）ノッチ試験体を用いて、欠陥開口面側からフェーズドアレイ UT を適用し、深さ 5～20mm の EDM ノッチに対する深さサイジング精度を明らかにした[5],[6]。

しかしながら、対象部位の板厚（概略 80mm）の 1/2（40mm）程度の深い欠陥についてもサイジング性能を評価し、高精度化を図ることは、プラントの健全性評価の観点から重要である。

本報告では、探傷領域を板厚方向に領域分けし、各領域について選定した探傷子を用いて探傷性能を明らかにし、その結果に基づき、欠陥情報（位置、概略長さ等）および欠陥深さの大小判別などを可能とした深さ測定要領を作成し、フローとして纏めた。さらに、この探傷要領に従い、ニッケル基合金溶接部 EDM ノッチ付与試験体に適用した結果、欠陥深さは、良好な精度で評価されたので、欠陥深さ測定要領およびサイジング評価結果について報告する。

### 2. 試験方法

#### 2.1 供試体

試験体は、探傷性能確認用試験体およびニッケル基合金溶接部試験体（突合せ溶接部の溶接線直交方向に EDM ノッチが付与）である。

連絡先: 平澤 泰治, 〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1,  
(財)電力中央研究所 材料科学研究所  
電話: 046-856-2121, E-mail: hirasawa@criepi.denken.or.jp

探傷性能確認用試験体は、Fig.1 に示すような横穴試験体である。試験体には、直径が 2mm の貫通横穴が、深さ位置 Z は、Z=3, 5~40 (5mm ピッチ) に合計 9 個付与されている。

ニッケル基合金溶接部試験体は、突合せ溶接部の溶接線直交方向に半楕円形状の EDM ノッチが付与されている。試験体の一例を Fig.2 に示す。また、Table 1 に、EDM ノッチ付与条件を示す。EDM ノッチ深さは、2, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40mm、長さはすべて 10mm である。

## 2.2 試験方法

試験に用いた探傷装置は、フェーズドアレイ UT 装置 (DynaRay 256/256 : Zetec 社製) である。

用いたアレイ探触子は 3 種類で、仕様および適用対象を Table 2 に示す。表より、①は、公称周波数 2MHz、振動子寸法 10mm×0.8mm、チャンネル数 64ch (以下、略号 2L(10)) で浅い欠陥探傷用、②は、公称周波数 2MHz、振動子寸法 20mm×0.6mm、チャンネル数 64ch (以下、略号 2L(20)) で中程度の深さの欠陥探傷用、③は、2 個のマトリクスアレイ探触子を配置したピッチキャッチ探傷用探触子であり、公称周波数 2MHz、振動子寸法 3.1mm×3.1mm、各々のチャンネル数 72ch (以下、略号 2MPC) で、深い欠陥探傷用として選定した。

溶接部試験体の探傷は、直接接触法で X-Y スキャナを用いた自動 UT を行った。

## 3. き裂深さ測定要領

### 3.1 き裂深さ測定要領の考え方

本研究の対象であるニッケル基合金溶接部の欠陥深さ測定においては、1) 対象部位の板厚が 80mm 程度と厚く、2) 検査対象である溶接金属部は、超音波の減衰・散乱が大きい難探傷部位であり、3) 深さ 40mm 程度までの欠陥を高精度に深さ測定することを考慮し、複数のアレイ探触子を用いて、き裂深さを板厚方向に領域分けした探傷方法を検討した。

### 3.2 探傷性能評価

ここでは、前報[5],[6]の結果を考慮して選定した 2 種類のアレイ探触子 2L(10)および 2L(20)に加え、新たに選定した 2MPC について、探傷性能を確認した。

探傷は、アレイ探触子を横穴試験体上に走査して行った。ここで、探傷条件は、振動モードは縦波、

屈折角  $\theta$  は、 $\theta=30\sim 80^\circ$  (1° ピッチ) とし、横穴からの反射波のエコー高さを測定し、反射エコー強度と超音波ビームの集束深さの関係を調べた。

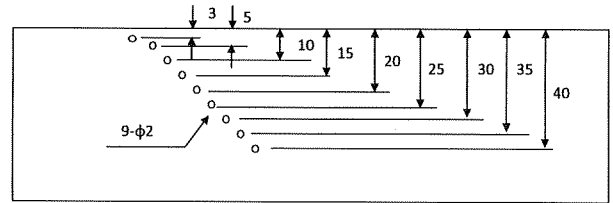


Fig.1 Standard block with side drilled holes

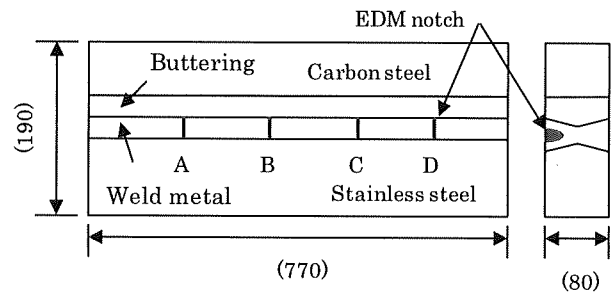


Fig.2 Nickel based alloy weld specimen with EDM notches in weld metal area

Table 1 EDM notch conditions of nickel alloy weld specimen

Area	Direction	Depth (mm)	Length (mm)
Weld metal	Axial	d=2,5,7,10,15,20,30,40	L=10

Table2 Specification of phased array probes

	name	Specification	Target
①	2L(10)	Type : Linear ( Small size) Freq.: 2MHz Mode: Longitudinal Element size: 10x0.8mm No. of channels: 64ch	Shallow crack
②	2L(20)	Type: Linear (Middle size) Freq.: 2MHz Mode: Longitudinal Element size: 20x0.6mm No. of channels: 64ch	Middle crack
③	2MPC	Type: Dual matrix Freq.: 2MHz Mode: Longitudinal Element size: 3.1x3.1mm No. of channels: 72ch (T/R)	Deep crack

### 3.2.1 アレイ探触子 2L(10)

アレイ探触子 2L(10) を用いた探傷は、探触子の開口寸法を 10mm×12.8mm (16ch) に固定し、集束深さを F=10、20、30mm の 3 条件変えて行った。

探傷結果の代表例として屈折角 45° の結果を Fig.3 に示す。図は、探傷断面画像 (B スコープ; 上段) と横穴からの反射エコー高さ分布 (反射エコーのエンベロップ; 下段) である。反射エコー強度は、深さ 3mm の横穴からが最も大きく、横穴の深さ位置が大きくなるに従い減少し、かつ超音波ビームの広がりも大きくなる傾向を示す。次に、横穴反射エコーの最大振幅を測定 (距離振幅特性曲線) し、Fig.4 に示す。横穴反射エコー高さは、集束位置 F に依らず、横穴深さ位置が大きくなるに従い低下する傾向を示す。また、いずれの条件でもエコー高さ分布に大きな差は認められない。アレイ探触子 2L(10) は、浅い欠陥を対象としていることから、条件は、開口寸法 10mm×12.8mm、集束深さ F=10mm とした。

### 3.2.2 アレイ探触子 2L(20)

アレイ探触子 2L(20) を用いた探傷は、探触子の開口寸法を 20mm×19.2mm (32ch) に固定し、集束深さを F=20、30、40mm の 3 条件変えて行った。

探傷結果の代表例として屈折角 45° の結果を、Fig.5 に示す。図は、探傷断面画像と横穴反射エコー高さ分布である。横穴反射エコーは、Z=3mm の横穴で最も大きく、横穴の深さ位置が大きくなるに従い、横穴からの反射エコー強度は減少する。アレイ探触子 2L(20) の距離振幅特性曲線を調べた結果を、Fig.6 に示す。図より、横穴反射エコー強度は、集束位置 F に依らず、大きな違いは認められなかった。

アレイ探触子 2L(20) は、中程度の深さを適用対象としており、探傷条件は開口寸法 20mm×19.2mm、集束深さ F=20mm とした。

### 3.2.3 アレイ探触子 2MPC

2分割型マトリクスアレイ探触子 2MPC は、探傷条件として、送受信ともに開口寸法を 37.2mm×18.6mm (72ch) とし、集束深さを F=10、20、30、40mm と 4 条件変えて、横穴試験体を探傷した。

探傷結果の代表例を Fig.7 に示す。図は、屈折角 45° の結果であり、探傷断面画像と横穴反射エコー高さ分布を示してある。集束深さ位置を F=10~40mm と変えたときに、横穴からの反射強度は、集束深さ位置 F と同じ横穴位置 Z で最も高くなっており、超音波ビームの集束効果が適正に得られている

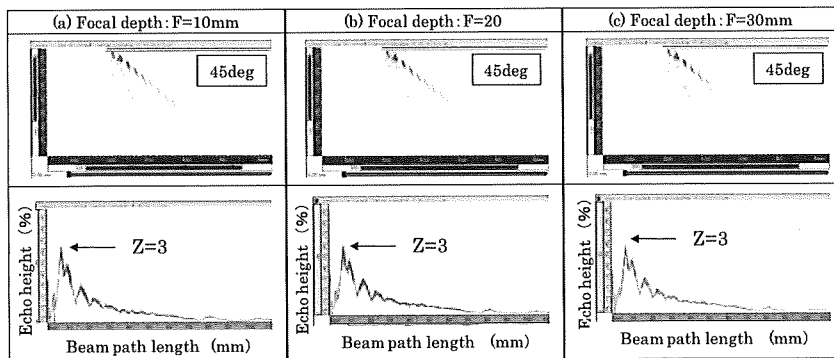


Fig.3 Effect of focal depth of phased array probe 2L(10)

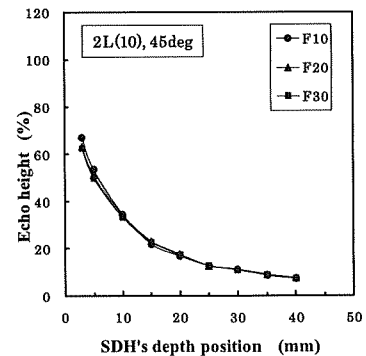


Fig.4 DAC curve at array probe 2L(10)

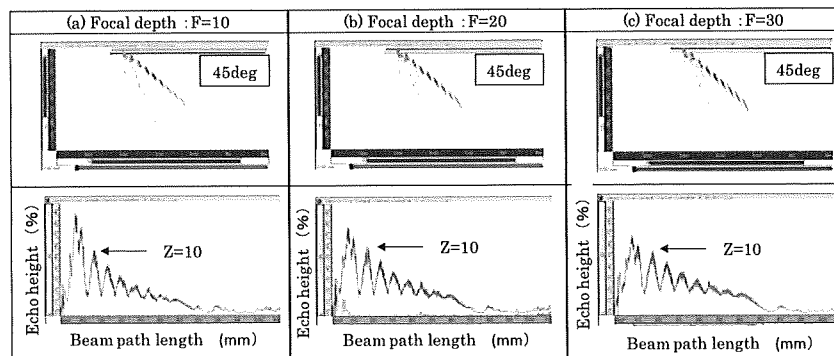


Fig.5 Effect of focal depth of phased array probe 2L(20)

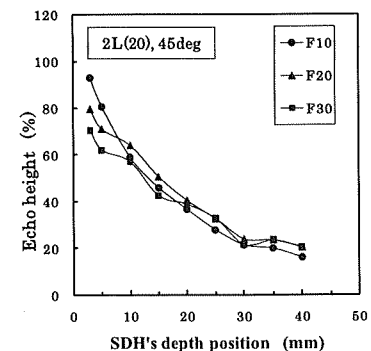


Fig.6 DAC curve at array probe 2L(20)

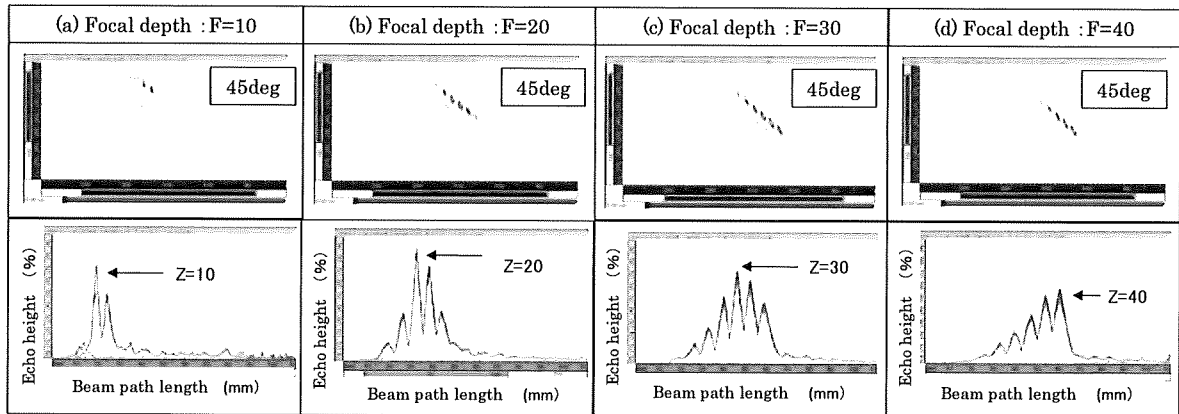


Fig.7 Effect of focal depth of phase

ことがわかる。

次に、これらのデータから、距離振幅特性曲線を調べ、Fig.8 に示す。図は、屈折角  $45^\circ$  の結果であり、探傷感度は同一条件で表示している。集束条件を適正に設定することで、深さ 40mm までの欠陥に対してほぼ同一の感度で探傷が可能となり、欠陥端部の検出感度の低下を抑えることが可能となり、欠陥深さを適正に評価できると考えられる。なお、深さ 10mm 程度以下は不感帯領域である。

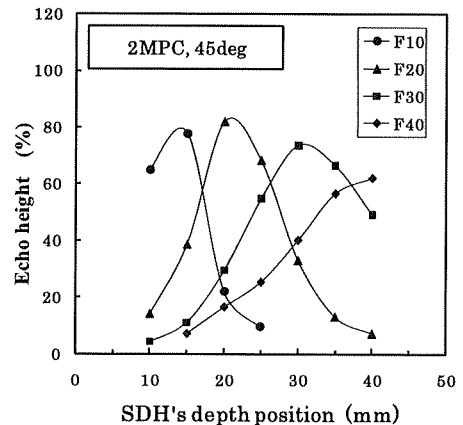


Fig.8 DAC curve at array probe 2MPC

### 3.3 欠陥深さ測定要領

上記の結果をもとに、深さ測定に関する手順を整理し、深さ測定フローとして提案した。そのフローを Fig.9 に示す。欠陥深さ測定フローについて、ステップごとにその要点を記載する。

#### (1) ステップ 1

3 種類のアレイ探触子を用いて探傷し、データ収録を行う。ここで、適用するアレイ探触子は、①小型アレイ探触子（浅いき裂探傷用）、③2 分割型マトリクスアレイ探触子（深いき裂探傷用）、および②中型アレイ探触子（中程度深さのき裂探傷用）である。

#### (2) ステップ 2

ここでは、き裂の位置および概略長さ情報を抽出する。小型アレイ探触子の探傷データの中から屈折角  $70^\circ$  の探傷画像 (B, C, D スコープ) を観察し、欠陥の位置、概略長さを把握する。

探傷画像の一例を Fig.10 に示す。図は、深さ 2mm (長さ 10mm) の EDM ノッチの画像であり、C スコープから欠陥の位置および概略長さが求められる。また、D スコープから欠陥の概略形状も把握できる。

#### (3) ステップ 3

アレイ探触子①、②、③の探傷画像をもとに、欠陥の大小の判別を行う。

ここでは、探傷画像から欠陥の指示の有無を○、×で表示し、パターン A および B の場合は、浅いき裂、パターン C の場合は 深いき裂と評価する。

欠陥大小判別の一例として、深さ 5mm と 20mm の EDM ノッチの探傷結果を示す。Fig.11 は、アレイ探触子 2L (10) および 2MPC を用いたときの探傷画像である。深さ 5mm の EDM ノッチの場合、2L(10)では指示あり、2MPC では指示なしと評価されたため、浅いき裂 (10mm 以下) と評価する。

一方、深さ 20mm の EDM ノッチの場合、2L (10) および 2MPC の両方で欠陥指示が認められたため、深い欠陥と評価する。また、2MPC のデータでは、欠陥端部エコーが深さ 20mm 近傍に観察されており、欠陥深さは 20mm 程度と推定できる。

#### (4) ステップ 4

ここでは、き裂深さの詳細解析を行う。

き裂深さ測定では、収録した膨大なデータを解析評価する必要があるが、効率的な測定を行うために、予め評価用基本屈折角を設定して解析を行う。評価用角度は、①小型アレイ探触子では、 $60^\circ$  および  $45^\circ$ 、②中型アレイ探触子および、③2 分割型マトリクスアレイ探触子では、 $45^\circ$  とする。

詳細解析では、探傷波形データ (A スコープ) および探傷画像 (B、C 及び D スコープ) から、き裂指示 (き裂面および端部からの指示) の発生状況、き裂指示の連続性等を確認するとともに、疑似エコー (材料ノイズエコー) との識別を行い、端部エコー法にて深さ測定を行う。

ステップ3で浅いき裂 (深さ 10mm 程度以下) と評価された欠陥については、①小型アレイ探触子のデータを用いて深さ測定する。さらに、②中型アレイ探触子のデータについてもき裂深さを測定し、小型アレイ探触子によるき裂深さと比較、評価する。

これにより、適正なき裂深さ測定が可能となる。また、ステップ3で深いき裂 (深さ 10mm 程度以上) と評価された欠陥については、③2分割型マトリクスアレイ探触子の探傷データを用いて深さ測定する。ここでは、複数集束条件 (F=10、20、30、40mm) の探傷画像データからき裂指示位置を観察し、ほぼ同じ深さ位置に表示されていることを確認することで、き裂端部がより適正に把握できる。

(5) ステップ5

ステップ4の結果を総合的に評価して、最終的なき裂深さを求める。

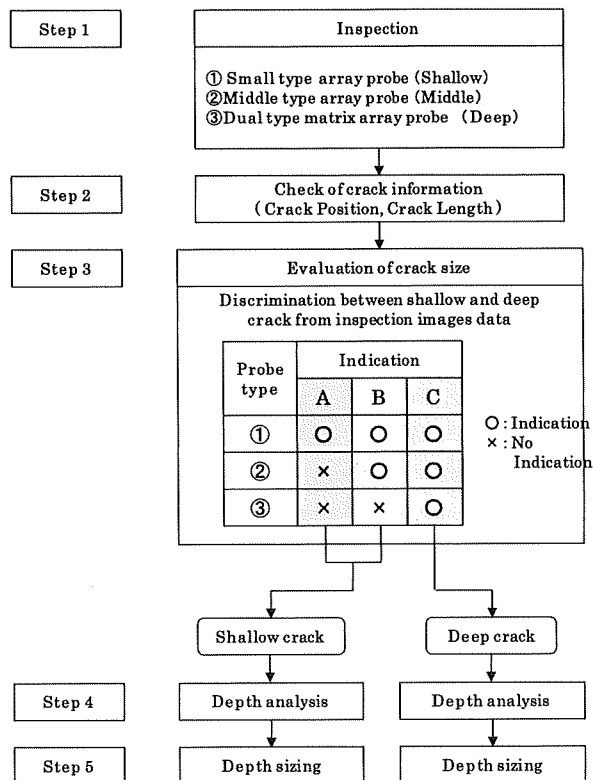


Fig.9 Flowchart of defect depth sizing procedure

4. 欠陥深さサイジング評価

ニッケル基合金溶接部 EDM ノッチ付与試験体を用いて、上記探傷手順で欠陥深さ測定を行った。

探傷は、EDM ノッチに対して両方向とし、Fig.9のき裂深さ測定要領に従って、データ収録および欠陥深さ測定を行った。

EDM ノッチに対する探傷画像を、Fig.12に示す。図中には、開口部エコーおよび端部エコーを矢印および丸印で示してある。深さ 5mm~40mm の EDM ノッチに対して端部エコーを検出でき、深さ評価を行った。その結果を Fig.13 に示す。データ点数は少ないが、統計的な誤差評価を試みた結果、誤差平均は 0.91mm、RMS 誤差は、1.03mm であった。

深さ測定誤差の RMS 誤差は、ASME Code Sec.XI App.VIII の性能実証時の合格基準である RMS 誤差 3.2mm と比べ、良好な精度で評価されたといえる。

上記結果から、ニッケル基合金溶接部のき裂深さ法に対するフェーズドアレイ UT の有効性が明らかとなった。

今後は、本き裂深さ測定要領について、SCC き裂に対する深さサイジング性能を評価する。

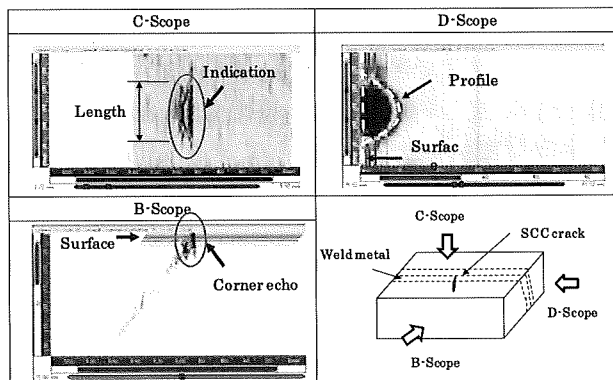


Fig.10 Example EDM notch inspection images at 2L(10)

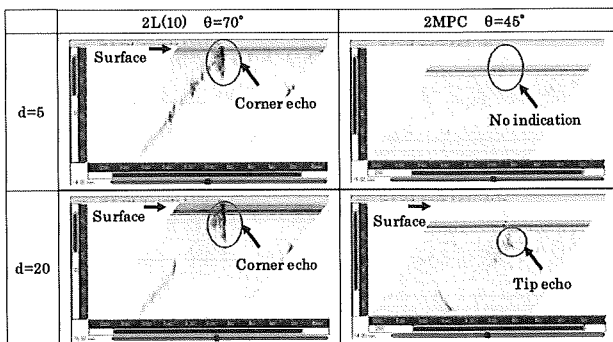


Fig.11 B-scan images of EDM notches (Array probe:2L(10) & 2MPC)

#### 4. 結言

ニッケル基合金溶接部に対して、欠陥開口面側からのフェーズドアレイ UT による深さ測定の高精度化に向けた欠陥深さ要領を提案し、フローとしてまとめた。さらに、本要領に従い、ニッケル基合金溶接部 EDM ノッチ付与試験体に適用した。それらの結果を以下にまとめる。

- (1) 対象部位の板厚の半分程度 (40mm) のき裂の深さ測定に適用するためのアレイ探触子を選定し、探傷性能を明らかにし、各々のアレイ探触子の適用板厚範囲を明らかにした。
- (2) 適用アレイ探触子の探傷画像 (B、C、D スコープ表示) から、欠陥情報 (欠陥位置および概略欠陥長さ) の把握および欠陥大小の判別が可能なき裂深さ測定要領を作成し、フローとしてまとめた。
- (3) き裂深さ測定要領に基づき、フェーズドアレイ UT をニッケル基合金溶接部に付与した EDM ノッチ試験体に適用した結果、ノッチ深さ 5mm ~ 40mm の範囲で深さ測定が可能であり、深さは、誤差平均 0.91mm、RMS 誤差 1.03mm と良好な精度で評価できた。
- (6) 上記結果から、ニッケル基合金溶接部のき裂深さ測定に対するフェーズドアレイ UT の有効性が明らかとなった。

#### 参考文献

- [1] 原子力・安全保安院：加圧水型軽水炉の一次冷却材圧力バウンダリにおける Ni 基合金使用部位に係る検査等について，NISA-163a05-2 (2005)
- [2] 関西電力(株)プレスリリース：大飯発電所 3 号機の定期検査状況について (原子炉容器 A ループ出口管台溶接部の傷の原因と対策)，(2008.9.26)
- [3] 西田純一郎他：セーフエンド溶接部に対する UT サイジング手法の高度化，日本保全学会 第 6 回学術講演会要旨集，pp.236-240，(2009.9)
- [4] 平澤泰治：原子力プラント用フェーズドアレイ超音波探傷技術，東芝レビュー，Vol.60，No.10，pp.48，(2005)
- [5] 平澤泰治，福富広幸：ニッケル基合金溶接部の欠陥深さサイジングに対する超音波探傷法の適用性評価，電力中央研究所報告，Q09025，(2010.5)
- [6] 平澤泰治，福富広幸：ニッケル基合金溶接部の欠陥深さサイジングに対するフェーズドアレイ UT 法の適用性評価，日本保全学会 第 7 回学術講演会要旨集，pp.61-66，(2010.7)

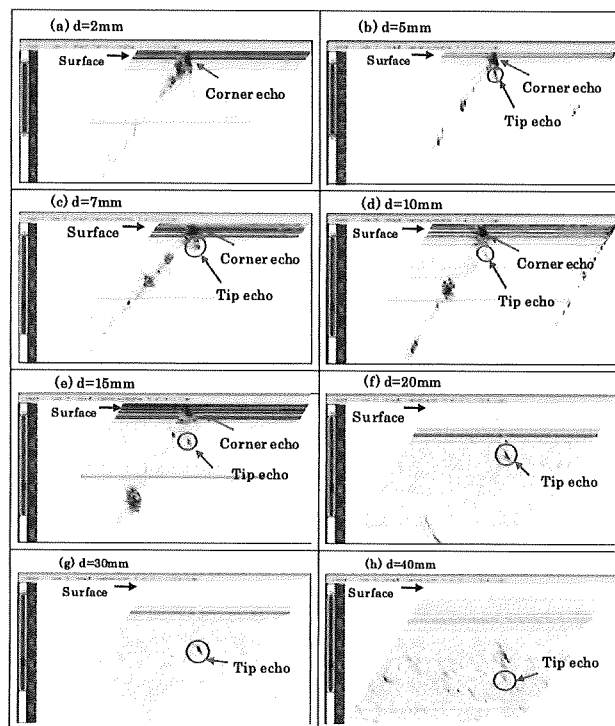


Fig.12 B-scan images of EDM notch specimen by PAUT

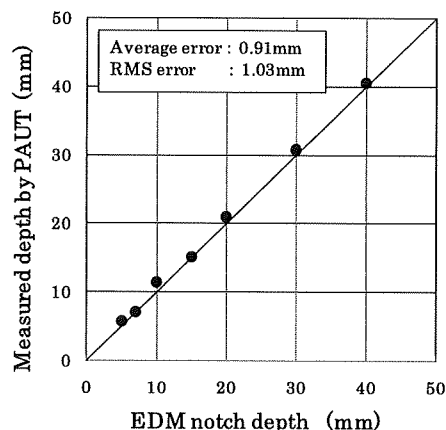


Fig.13 EDM notch depth sizing accuracy